26296 DUP.

IGM86-107-357
CNRC 26296

TROISIÈME RAPPORT D'ÉTAPE

ÉTUDE DES PERFORMANCES ET DE LA FABRICATION D'ENGRENAGE EN ACÉTAL ET EN UHMWPE FORGÉS

préparé pour:

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHE
Institut de Génie des Matériaux
75, boul. Montagne
BOUCHERVILLE (Québec)

Mars 1984 Projet CDT P828

CDT
Centre de Développement Technologique
École Polytechnique de Montréal

PROJET CDT P828

TROISIÈME RAPPORT D'ÉTAPE

ÉTUDE DES PERFORMANCES ET DE LA FABRICATION D'ENGRENAGE EN ACÉTAL ET EN UHMWPE FORGÉS

préparé pour:

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHE
Institut de Génie des Matériaux
75, boul. Montagne
BOUCHERVILLE (Québec)

par:

Patrick Girard, Associé professionnel de Recherche
Raymond Gauvin, professeur titulaire
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

soumis par:

LE CENTRE DE DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
Campus de l'Université de Montréal
Case postale 6079, Succursale A
Montréal, Québec H3C 3A7

approuvé par:

Patrick Girard, Associé professionnel de Recherche
et
H. Yelle, ing

Mars 1984

H. Yelle, ing
Directeur du projet

CDT
Centre de
Développement
Technologique
École Polytechnique
de Montréal

TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
PRÉAMBULE	1
I- INTRODUCTION	2
II- MATÉRIEL DE FORGEAGE UTILISÉ	2
II-1: Moule	3
II-2: Machine d'essai de fatigue	4
II-3: Machine d'essai en flexion statique	5
III- ESSAIS DE FATIGUE	6
IV- ESSAIS DE FLEXION STATIQUE SUR UNE DENT	7
V- INFLUENCE DE DIFFÉRENTS PARAMÈTRES SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ENGRENAGES FORGÉS.	8
V-1: Influence de la température du matériau	9
V-2: Influence du temps de maintien	9
V-3: Influence de la température du moule	10
VI- CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS	10

CDT
Centre de
Développement
Technologique
École Polytechnique
de Montréal

LISTE DES TABLES

TABLE no 1: Essais de fatigue

TABLE no 2: Essais de flexion statique

CDT
Centre de
Développement
Technologique
École Polytechnique
de Montréal

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Photo de la presse de 200T

Figure 2: Photo du moule utilisé

Figure 3: Correction de denture utilisé lors de la fabrication du moule

Figure 4: Machine d'essais à couple ferme

Figure 5: Machine d'essais de flexion statique

Figure 6: Résultats d'essais de fatigue

Figure 7: Variation de la contrainte de flexion en fonction des différents paramètres

a): Variation de la contrainte de flexion en fonction de la température du matériau

b): Variation de la contrainte de flexion en fonction du temps de maintien

c): Variation de la contrainte de flexion en fonction de la température du moule

Figure 8: Schéma du Moule en cours de fabrication

CDT
Centre de
Développement
Technologique
École Polytechnique
de Montréal

PRÉAMBULE

Ce rapport se situe dans le cadre du contrat de recherche accordé à l'École Polytechnique pour l'institut de génie des Matériaux en mars 1983. Il présente l'état d'avancement des travaux au 1er mars 84 et fait suite à deux autres rapports (1, 2) dont le plus important est celui de septembre 85.

Le premier chapitre présente les équipements d'essais utilisés pour ce projet. Par la suite, des résultats d'essais de fatigue et de flexion sont présentés pour le Polyethylène ultra haute densité à très haut poids moléculaire*. Quelques résultats d'essais sont aussi présentés pour l'Acetal DELRIN.

La fin de ce rapport présente l'instrumentation actuellement en cours d'installation sur la presse pour permettre la commande par microprocessus, ainsi que les modification apportées au moule.

Les auteurs de ce rapport remercient expressément M. Brézina, professeur à l'Université de Sherbrooke, pour son aide technique et matérielle. Par ailleurs, l'excellent travail fourni par M. Jacques Beausoleil, technicien, a beaucoup contribué à l'avancement du projet.

Pour la suite de ce rapport, on a utilisé le terme UHMWHDPE
(Ultra high molecular weight high density polyethylène)

I- INTRODUCTION

Après l'étude et la mise au point de la méthode de forgeage, nous sommes actuellement dans la phase d'essais systématiques des engrenages forgés pour évaluer leurs caractéristiques de résistance en fatigue et en flexion.

Les premiers essais de forgeage se sont effectués sur une machine d'une capacité de 100 tonnes et ayant une vitesse de déplacement de 1 po/mn. Nous avons fini l'installation d'une nouvelle presse d'une capacité de 200 tonnes et dont la vitesse de déplacement 3 po/mn. (voir Figure 1). Cette vitesse plus élevée nous permettra d'évaluer si la vitesse de forgeage est un paramètre important du processus de fabrication. Cependant, les essais présentés dans ce rapport ont été effectués sur la presse 100 tonnes.

Nous sommes en train d'étudier des méthodes de dépouillement statistiques des résultats par régression à plusieurs paramètres. Ces méthodes nécessitent une connaissance préliminaire de la variation des paramètres de sortie du processus (contrainte en fatigue, qualité de l'engrenage) en fonction des paramètres de contrôle utilisés, soient: temps de maintien, température du matériau , température du moule, taux de déformation, matériau, pression de moulage. Quelques résultats quant à la variation de ces paramètres sont présentés. Le nombre d'engrenages déjà moulés est de l'ordre de 150, cependant, les méthodes statistiques, telles que précédemment décrites exigent un grand nombre de points ainsi qu'un travail considérable des dépouillements. Nous ne présentons dans ce rapport que quelques résultats partiels que nous estimons indicatifs de l'état d'avancement du projet.

II-1 Moule utilisé

La figure no. 2 représente le moule utilisé pour les essais. Ce moule est actuellement prêté par M. Brézina de l'Université de Sherbrooke. Il est constitué d'une cavité en forme d'engrenage externe et d'un piston en forme d'engrenage. Les tolérances très serrées entre les deux pièces ont nécessité l'utilisation d'un usinage par électroérosion par fil sur machine à commande numérique. Cet usinage a été réalisé à partir d'un profil corrigé par M. Brézina (1) pour tenir compte du retrait de la matière après forgeage. (Voir figure 3).

Pour obtenir une bonne précision dimensionnelle de la forme de la denture une pression très élevée est nécessaire: 31 000 PSI (210 MPa) est la pression de forgeage utilisée jusqu'à aujourd'hui avec la presse de 100 tonnes dont nous disposion pour le début des travaux.

Ceci correspond aux observations de Coffmann [3] qui rapporte que la pression de forgeage nécessaire augmente rapidement avec la diminution d'épaisseur de la pièce. La nouvelle presse de 200 tonnes permet d'utiliser des pressions de forgeage jusqu'à 62 000 PSI (420 MPa). Cependant, des problèmes de résistance du moule apparaissent et ces pression ne sont pas utilisables avec le moule actuel.

Un moule corrigé réalisé en matériau à haute résistance mécanique et incorporant diverses autres modifications est en cours de fabrication. Il est décrit au chapitre VII: Travaux futurs. La régulation de température est réalisée par des colliers chauffants installés sur le moule commandés par un contrôleur de température de précision.

II-2 Machine et méthode d'essais de fatigue

Des essais de fatigue sont effectués sur deux machines d'essais à bouche fermée, décrite dans la référence [4]. (Voir figure 4).

Les charges élevées supportées par les engrenages forgés ont nécessitées des transformations de la machine d'essais. Des engrenages de métal plus larges ont été installés pour augmenter la capacité de charge de la machine, qui posait des problèmes de fiabilité mécanique.

Bien que deux machines soient utilisées, il est impossible d'obtenir des courbes de fatigue pour chaque valeur des paramètres de mise en oeuvre essayés. En effet, les paramètres principaux utilisés sont au nombre de 6: matériau, temps de maintien, pression de maintien, température du moule, température du matériau, pourcentage de déformation. 4 points par paramètre donnent un total d'essais supérieurs à 4 000, totalement irréaliste.

Ces essais actuellement en cours seront donc dépouillés par régression statistique à partir d'une équation de la forme.

$$\sigma = A \log N \qquad \text{avec } \sigma \text{ contrainte en MPa, } N \text{ nombre de cycles} \qquad [1]$$

Cette formule correspond à la représentation d'une droite sur le papier logarythmique habituellement utilisé. Elle permet théoriquement de définir une courbe d'essais à partir d'un seul point, cependant, la connaissance de l'influence d'un autre paramètre, par exemple le temps de maintien, sous la forme:

$$\sigma = B * f(\text{temps de maintien}) \qquad [2]$$

Permet en général d'étudier une équation de régression de la forme [1] x [2], soit [3].

$$\sigma = C * \log(N) * f \text{ (temps de maintien)}$$

Dans ce cas, la courbe de fatigue est calculée à partir des points de mesure obtenus avec plusieurs valeurs du temps de maintien. Si l'équation [2] est bien représentative du phénomène observé, cette méthode permet une amélioration considérable de la précision de définition de la courbe [1] avec un nombre limité de points de mesure; ce qui représenterait un avantage considérable par rapport à la méthode habituelle.

II-3 Machine d'essais en flexion statique

Une méthode beaucoup plus rapide d'évaluation de la résistance en flexion des engrenages forgés est d'effectuer un essai destructif de résistance en flexion statique sur une seule dent. Ceci devrait correspondre en gros nombre du cycle N = 0 sur les courbes de fatigue. Dans une telle comparaison, il faut tenir compte que les essais statiques se font sur une seule dent alors qu'en fatigue la charge est répartie sur plusieurs dents.

La machine d'essais en flexion statique est présentée à la figure 5. Un système de bras de levier permet d'appliquer une charge sur une seule dent de l'engrenage de plastique essayé. Pour ce faire, un certain nombre de dents de l'engrenage de plastique sont supprimées pour éviter les effets de répartition de la charge sur plusieurs dents et assurer ainsi la précision de la mesure.

III- ESSAIS DE FATIGUE

La plus grande quantité d'essais de fatigue a porté à date sur le UHMWHDPE. Quelques essais ont été effectués sur l'acétal mais des problèmes au niveau de la qualité et de la répetabilité des essais obtenus ont retardé son étude.

Pour tous les essais présentés, le taux de déformation a été de 43%, mesuré par:

$$\Delta\% = \frac{H_1 - H_2}{H_2} \times 100 \qquad \text{ou: } H_1 = \text{hauteur initiale}, \; H_2 = \text{hauteur finale} \qquad [4]$$

Selon la procédure habituelle, la contrainte dans la dent a été calculée par la formule:

$$\sigma_{Pa} = \frac{Wt}{F \times m \times Y} \qquad [5]$$

où: Wt = charge appliquée sur la denture
F = largeur de l'engrenage
m = module de l'engranage
Y = facteur de forme de LEWIS

Dans tous les cas Y a été calculé pour une charge appliquée au milieu de la dent, ce que nous considérons comme réaliste pour un engrenage de plastique qui fléchit beaucoup lorsque la charge est ap-

pliquée au sommet de la dent. Pour les essais considérés, cette valeur de y est:

$$Y = .578$$

La table no. 1 et la figure no. 6 présentent quelques essais de fatigue à titre de comparaison avec certaines références. La durée de vie augmente d'un facteur supérieur à 100 (cent) et la résistance en flexion du polyethylène forgé se trouve environ 50% plus élevée que celle du polyethylène usiné tel que mesuré par H. Yelle (4).

Nous avons effectué quelques points de mesure pour l'acétal, cependant, à date des problèmes de qualité du produit sont apparus: le matériau qui nous a été fournit ne permet pas d'obtenir de résultats aussi élevés que ceux de M. Brezina (5); il semble que des fissures apparaissent dans le matériel, même pour des taux de déformation assez faibles. Nous analysons actuellement le matériel fournit pour cerner l'origine du problème.

IV- ESSAIS DE FLEXION STATIQUE SUR UNE DENT

Ces essais ont été effectués sur la machine présentée à la figure 5. Comme pour les essais de fatigue, la charge a été appliquée au milieu de la dent, et la contrainte a également été calculée par l'équation [5].

La table 2 présente quelques résultats.

De manière générale, ces résultats corroborent ceux obtenus pour les tests de fatigues: on constate une augmentation considérable de la résistance des engrenages de UHMWPE forgés par rapport aux engrenages taillés. De la même manière, les résultats obtenus avec l'acetal

sont assez décevants et ne correspondent pas à ceux obtenus par M. Brézina pour l'acetal, ce que nous attribuons à un grade différent de résine. Les études sont en cours pour évaluer les raisons de ces divergences.

Notre conclusion actuelle sur les essais statiques effectués est qu'ils sont représentatifs de la courbe de fatigue correspondante.

Étant donné la durée considérable des essais de fatigue, nous allons essayer d'approfondir la relation entre la résistance statique d'un engrenage et une courbe de fatigue correspondante. Ceci permettrait d'obtenir un critère rapide d'évaluation d'un engrenage forgé, qui serait corroboré par quelques essais de fatigue.

V- INFLUENCE DE DIFFÉRENTS PARAMÈTRES SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ENGRENAGES FORGÉS

Étant donné que les différents paramètres sont interréactifs, un grand nombre de points de mesure est nécessaire pour s'assurer de la validité des résultats comme exposé au paragraphe II.2. Nous présentons ici nos conclusions sous formes de tendances générales. Les résultats définitifs se trouveront dans le rapport final sur ce projet. Nous présentons également ici les formes de courbes que nous pensons utiliser pour l'analyse statistique telle que définie au paragraphe II-2.

À part l'influence de la température du matériau, basée sur les résultats de M. Brézina (5) et vérifié par nous, les tendances présentées sont apparentes lorsqu'on analyse les résultats de flexion d'une dent du tableau 1.

V-1 Influence de la température du matériau

D'après les résultats de M. Brézina (5) et les nôtres à date, la variation de la résistance en flexion en fonction de la température du matériau a la forme présentée à la figure 2.

Cette forme de courbe se retrouve pour le UHMWPE et pour l'acetal. Il apparait de prime abord, qu'il existe une température optimale de forgeage pour les deux matériaux. Nous sommes actuellement en train de mesurer cette température optimale et d'évaluer sa validité en fonction des autres paramètres du processus. La forme de la variation peut être représentée par une équation polynominale de degré n du type;

$$\sigma = a_0 + a_1 T^1_{mat} + a_n T^n_{mat} \qquad [6]$$

Nous pensons qu'un degré 3 devrait suffir à représenter fidèlement la variation de σ.

soit: $\sigma = a_0 + a_1, Tmat + a_2 \; T^2mat^2 + a_3 T^3mat$

Le point optimal de fonctionnement A, (figure 7) serait alors trouvé par

$$\frac{d\sigma}{dTmat} = a_1 + 2a_2 Tmat + 3a_3 T^2_{mat} = 0 \qquad [7]$$

V-2 Influence du temps de maintien

La figure 8 présente la variation de la contrainte en flexion en fonction du temps de maintien. On constate que la contrainte en flexion augmente avec le temps de maintien. Un temps de maintien très

long serait donc plus favorable. Cependant, la forme de l'augmentation peut être représentée par l'équation suivante:

$$\sigma = a_0 (1. - e^{-a_1 T}) \qquad \text{où: } T = \text{temps de maintien} \quad [8]$$

a_0, a_1 = constantes

a_0 serait trouvé en utilisant un temps de maintien très long, et a_1 par régression statistique, et le temps de maintien choisit serait optimisé en fonction de la durée du cycle.

V-3 Influence de la température du moule

Il existe un point optimum pour le choix de la température du moule (figure 3). La variation de la contrainte de flexion en fonction de la température du moule peut être représenté par une courbe de la forme:

$$\sigma = a_0 + a_1 T_{moule} + a_2 (T_{moule})^2 + a_3 (T_{moule})^3 \quad [9]$$

et le point optimal de fonctionnement A (figure 2) peut être calculé par:

$$\frac{d\sigma}{d\, T_{moule}} = a_1 + 2a_2 T_{moule} + 3a_3 (T_{moule})^2 = 0 \quad [10]$$

VI- CONCLUSION

Lors de cette phase du projet, quelques problèmes ont été rencontrés au niveau de la qualité de l'acetal qui nous a été fourni. Ceci est lié au contrôle relatif que nous avons au niveau des fournisseurs. Nous essayons actuellement de régler ce problème.

Les résultats obtenus pour le UHMWPE confirment les espoirs que nous apportions dans ce procédé: augmentation considérable de la résistance de l'engrenage.

Nous sommes actuellement en train de réaliser un nouveau moule pour résoudre les deux problèmes qui se posent avec celui utilisé jusqu'à aujourdhui, qui sont:

- Existence d'une bavure sur la pièce finie formée entre l'engrenage interne et l'engrenage externe. Cette bavure engendra une déformation de la forme de la dent, tel qu'expliqué en [1].
- Résistance insuffisante du matériau du moule à des pressions de l'ordre de 30 000 PSI (400 MPa). La figure 10 présente le design envisagé: La pression serait transmise au matériau par un piston cylindrique au lieu d'un piston en forme d'engrenage et le matériau utilisé serait un acier allié pour résister à la pression.

Au niveau informatique, des programmes de traitements de données par méthodes de régression statistique sont actuellement en cours de développement, d'après les équations présentées au chapitre V.

La nouvelle presse de 200 tonnes, dont les commandes hydrauliques à servo-valve et l'instrumentation de mesure à été réalisée par nous à l'École fonctionne actuellement manuellement. Un système de contrôle du processus de forgeage et d'acquisition de données a microprocesseur est dans la phase finale de mise au point.

CDT
Centre de Développement Technologique
École Polytechnique de Montréal

TABLE 1: ESSAIS DE FATIGUE

No. Eng.	Mat'	F (po)	Couple (lbxpo)	N	σ MPa	REMARQUES
18	PE	.979	354	6.310^6	28.8	
27	PE	.973	129	1.810^7	10.5	Arrêt engrenage non brisé
12	PE	.978	313	1.710^7	25.5	Arrêt volontaire
23	PE	.980	148	1.710^7	12.	
8	PE	.977	309	1.210^7	25.2	Fini non brisé
14	PE	.980	312.5	2.310^6	25.4	Fini non brisé
22	PE	.980	325.7	1.110^7	26.5	Coeur abimé
13	PE	.975	342	1.710^7	27.9	
17	PE	.99	371	2.510^5	29.8	Coeur abimé
19	PE	.978	354	7.410^6	28.8	Déformé non brisé
66	PE	.79	255	2.610^7	25.7	
45	PE	.793	346	3.710^6	34.7	

REMARQUES: Fini non brisé signifie que les dents ont fléchies, mais n'ont pas brisées.

Coeur abimé signifie mauvaise qualité du forgeage occasionnant des erreurs d'engrênement

TABLE 2: ESSAIS DE FLEXION STATIQUE

(Charge appliquée au milieu de la dent)

no. eng.	Mat	Force lb	F po	σ MPa	Temps maintien	Température	
						matériau	moule
46	PE	46.2	.797	89.7	.5	300	150
47	AC	76.2	.801	143	.5	300	150
49	PE	97.5	.795	92.2	1	300	150
52	AC	82.5	.802	154	1	300	150
53	PE	60	.787	116	2	300	150
55	AC	91.25	.804	169	2	300	150
57	PE	55	.788	107	4	300	150
59	AC	91.25	.791	172	4	300	150
61	PE	46.26	.798	90	.5	300	180
63	AC	107.5	.835	191	.5	300	180
65	PE	50	.796	97	1	300	180
67	AC	81.25	.806	151	1	300	180
70	PE	48.75	.790	95	2	300	180
72	AC	110	.820	199	2	300	180
75	PE	57.5	.788	111	4	300	180
77	AC	81.25	.793	153	4	300	180
79	AC	77.5	.800	145	4	300	180
80	PE	80	.800	114	.5	300	165
81	PE	55	.796	106	.5	300	165
83	AC	105	.813	192	.5	300	165
85	AC	71.25	.805	133	.5	300	165
86	PE	60	.782	116	1	300	165
88	PE	61.25	.790	118	1	300	165
89	AC	112.5	.800	208	1	300	165
90	AC	82.5	.805	153	7	300	165
92	PE	60.25	.787	116	4	300	165
93	PE	65	.794	124	4	300	165
95	AC	106.7	.787	201	4	300	165
96	AC	100	.786	189	4	300	165
	PE	61.25	1	93	Références Engrenages taillés		
	AC	77.5	.5	218			
	AC	71.25	.5	215			
	PE	30	.5	97			

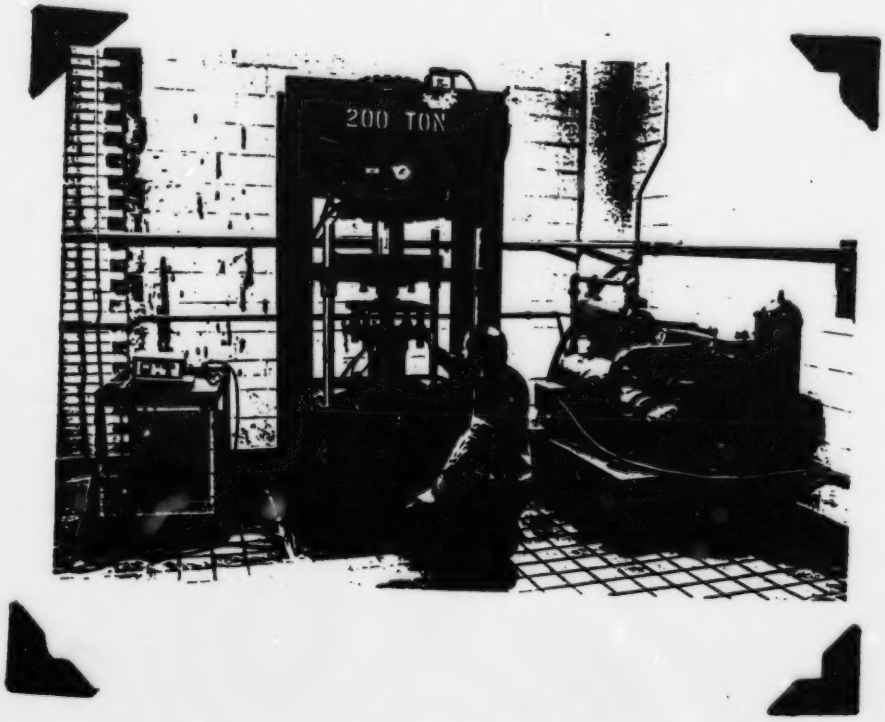

FIGURE 1: PHOTO DE LA PRESSE DE 200 TONNES

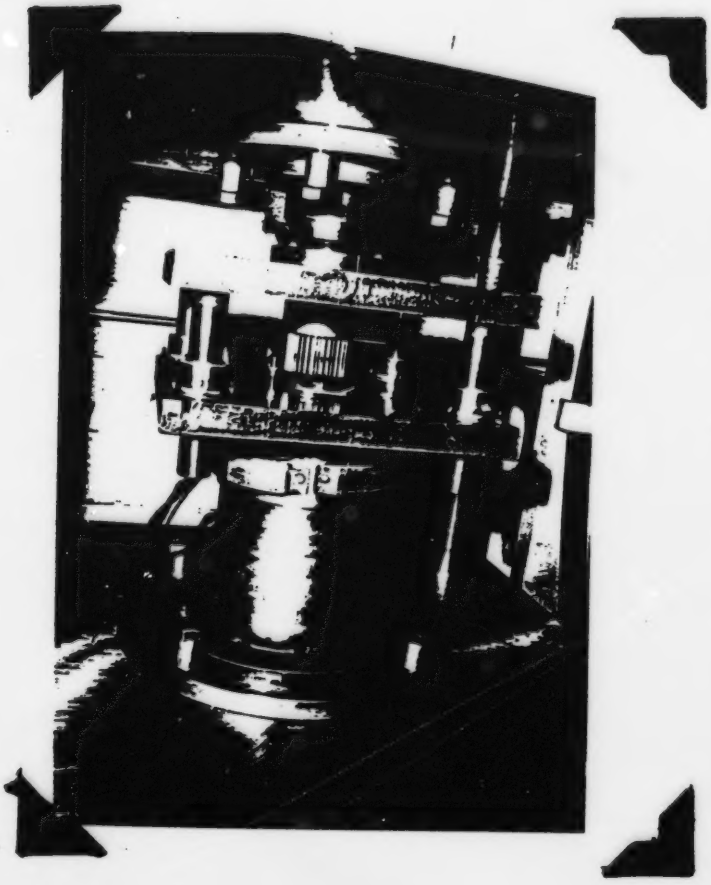

FIGURE 2: PHOTO DU MOULE UTILISE

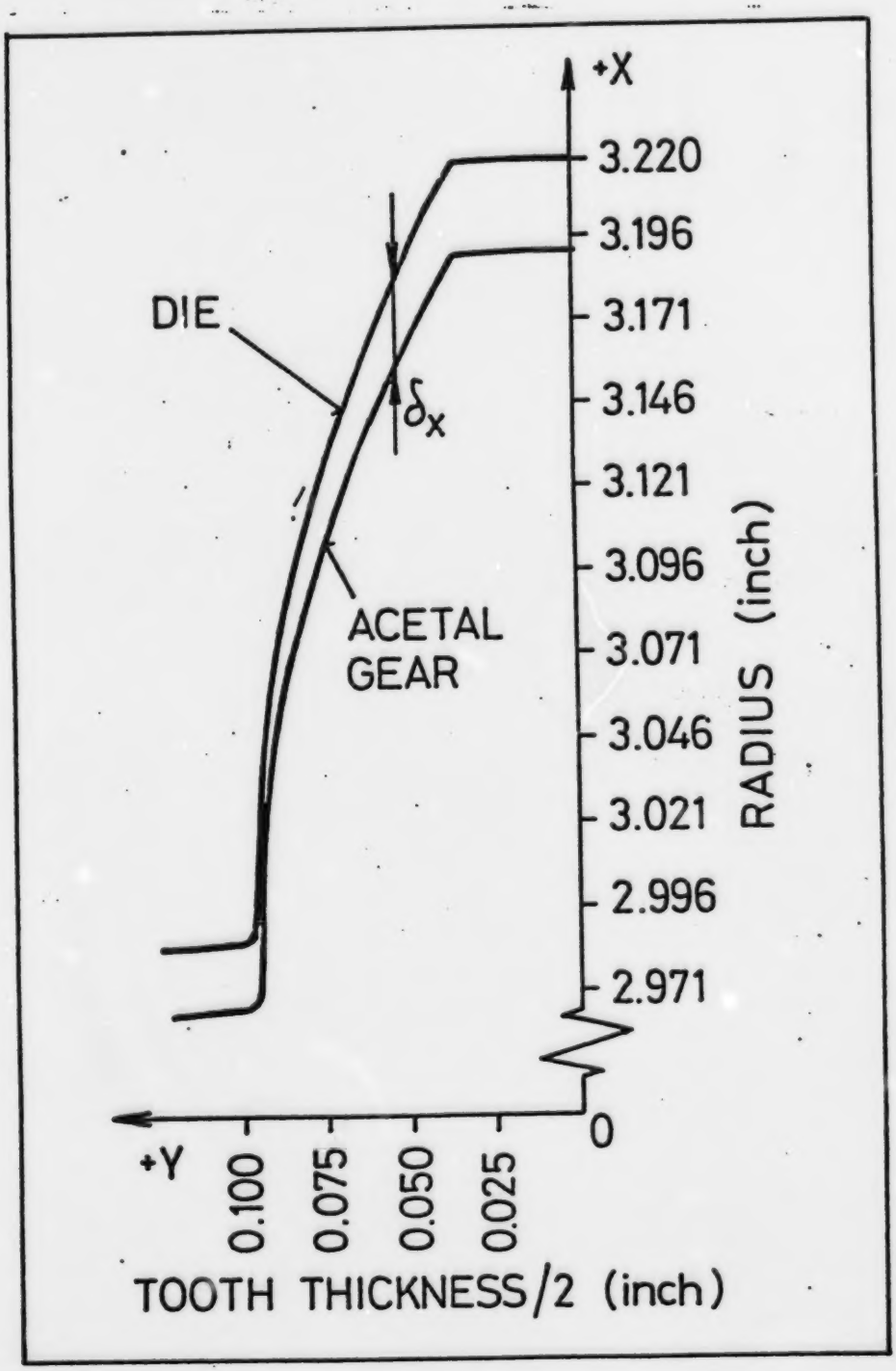

FIGURE 3: Correction de denture utilisée lors de la fabrication du moule; d'après Brézina (5).

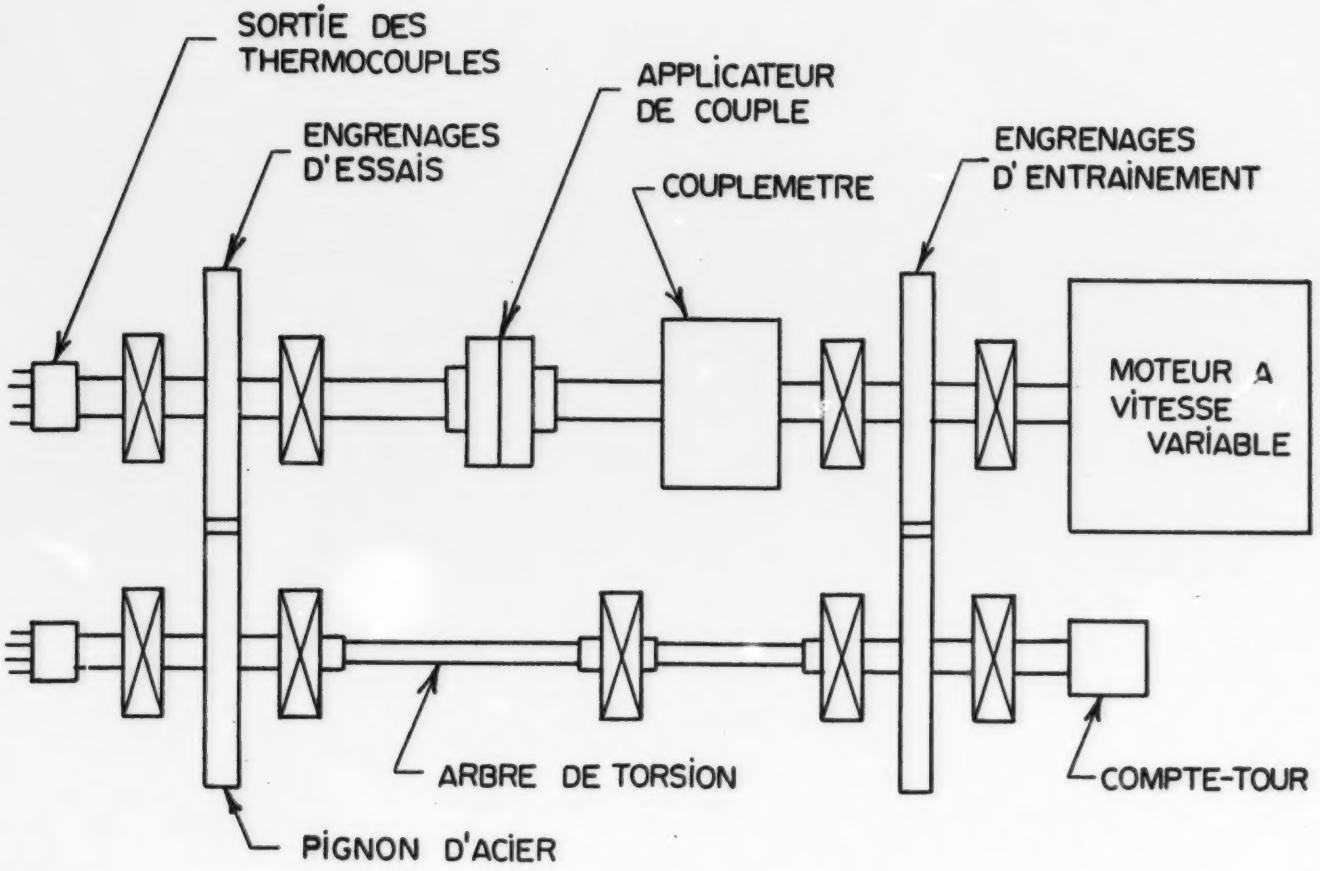

FIGURE 4: Machine d'essai à couple fermé

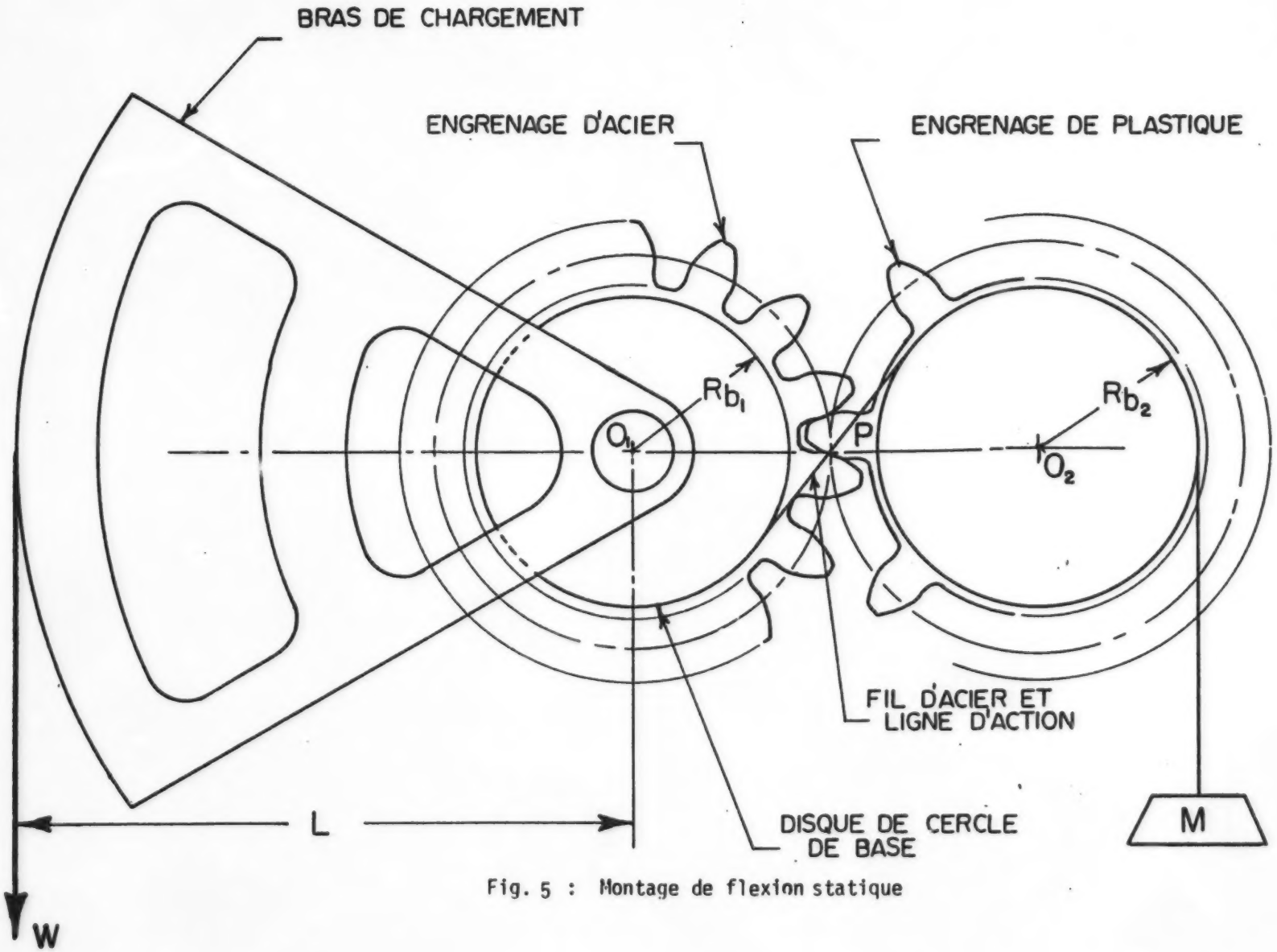

Fig. 5 : Montage de flexion statique

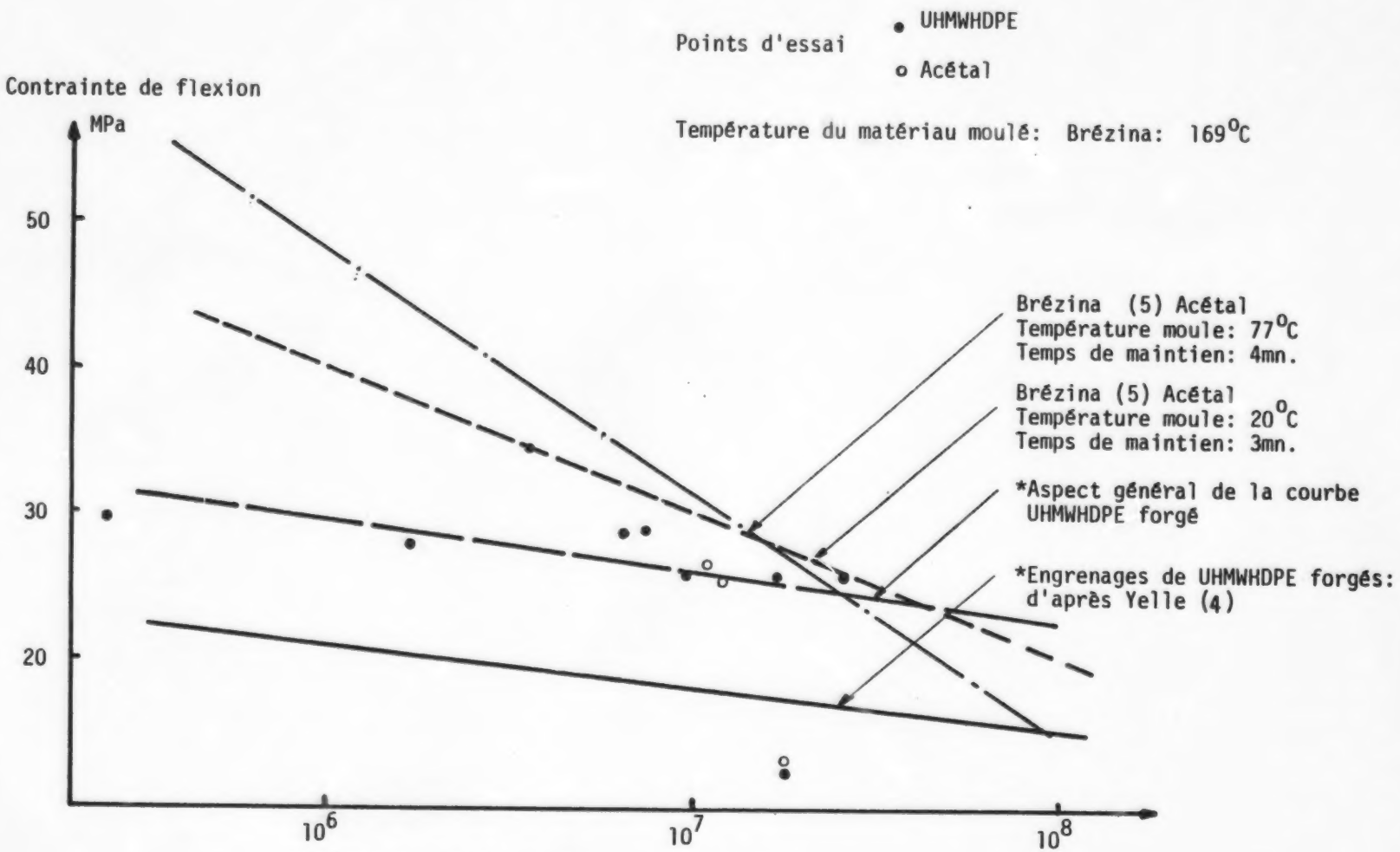

FIGURE 6: Résultats d'essais de fatigue

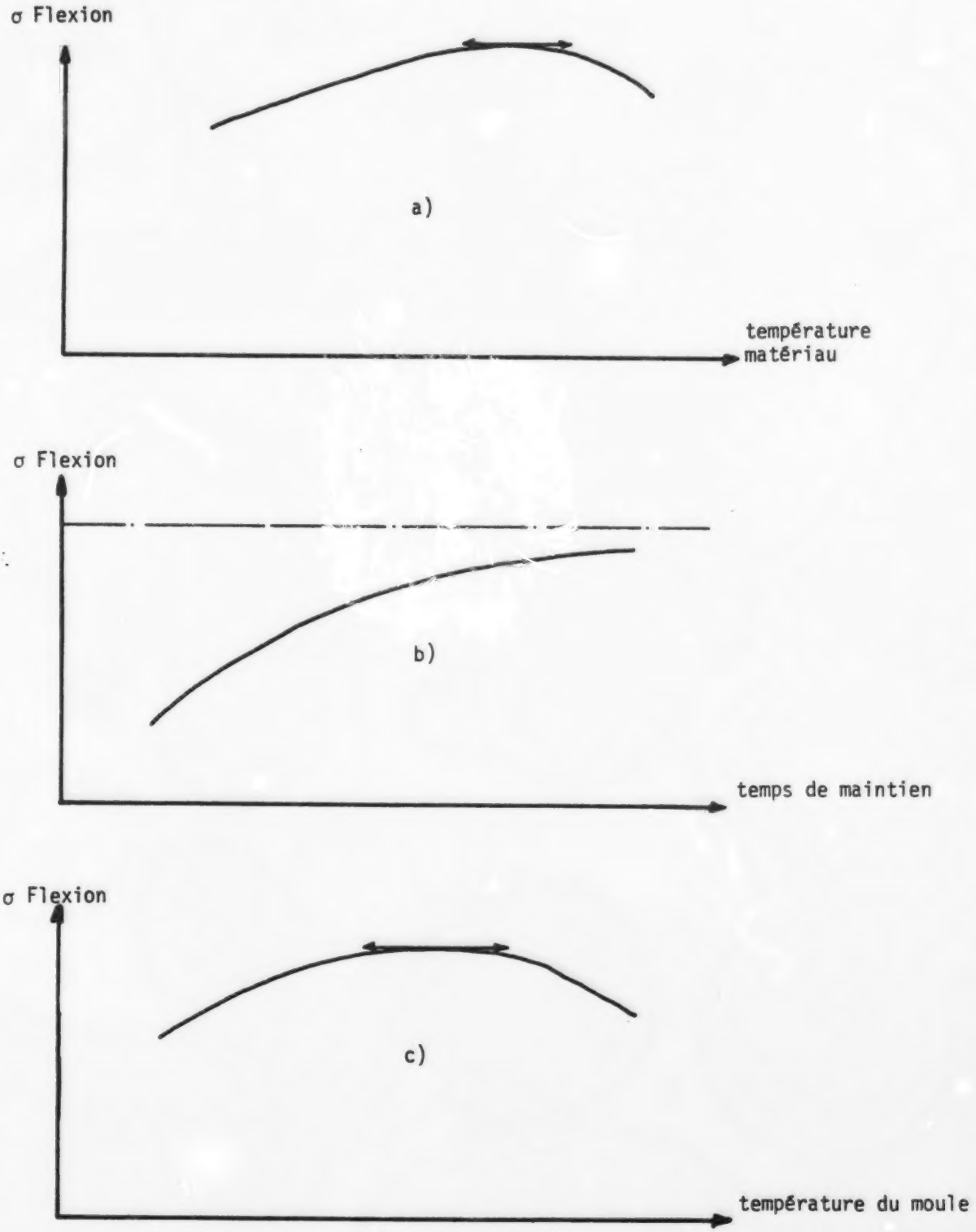

FIGURE 7: Variation de la contrainte de flexion en fonction de différents paramètres

1., PISTON
2, CENTRAGE
3, CYLINDRE
4, SYSTEME DE FERMETURE (3)
5, COURONNE DE MOULAGE
6, SUPPORT

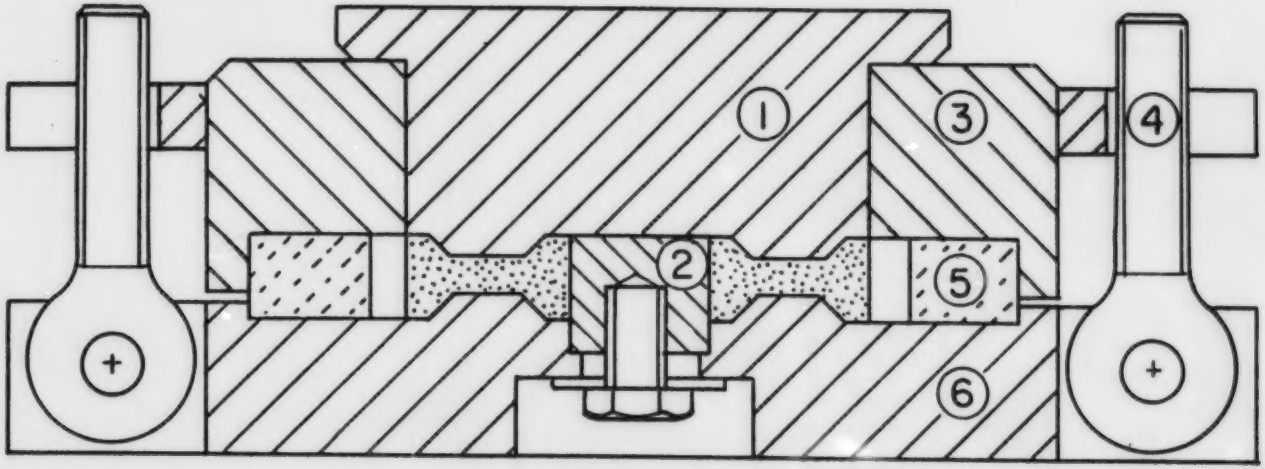

FIGURE 8: Schéma du moule en cours de fabrication

CDT
Centre de
Développement
Technologique
École Polytechnique
de Montréal

BIBLIOGRAPHIE

[1] GIRARD, P., Études des performances et de la fabrication d'engrenages en Acétal et en UHMWPE forgés. Premier rapport d' Étape, Septembre 83.

[2] GIRARD, P., YELLE, H., Études des performances et de la fabrication d'engrenages en Acétal et en UHMWHDPE forgés, Deuxième rapport d'Étape, Décembre 83.

[3] COFFMANN, P.M., Materials engineering, 74 (avril 68).

[4] YELLE, H., Études du comportement des engrenages cylindriques droits en matière plastique, thèse de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Mars 1973.

[5] BREZINA, M., BERTRAND, M., WIESER, P., Dimensional Stability and fatigue résistance of Acetal Homo polymer gears forged in the solid state. Century 2 I.P.I.G.C., San Franscisco, 1980.